



ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A NORMA ABNT NBR 14323:2013 E SUA VERSÃO DE 1999

Luciano Lins Vieira

lucianovieira.lv@outlook.com

Estudante Graduação de Engenharia Civil, Universidade Paulista.

SGAS Quadra 913 Conj. B - SHCS, Brasília - DF, CEP 70390-130, Brasília, DF, Brasil.

Juliana Cardoso Santos

julianasaaantos@gmail.com

Estudante Graduação de Engenharia Civil, Universidade Paulista.

SGAS Quadra 913 Conj. B - SHCS, Brasília - DF, CEP 70390-130, Brasília, DF, Brasil.

Braulio Gonçalves Mendes

Estudante Graduação de Engenharia Civil, Universidade Paulista.

SGAS Quadra 913 Conj. B - SHCS, Brasília - DF, CEP 70390-130, Brasília, DF, Brasil

Luciano Mendes Bezerra

lmbz@unb.br

Professor Associado, Universidade de Brasília

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília - CEP 70910-900

Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva

salenoyure@hotmail.com

Professor Adjunto, Engenharia Civil, UniCEUB

SEPN 707/907 - Asa Norte, Brasília - DF, 70790-075

RESUMO: *Os elementos estruturais de aço quando sujeitos à ação de um incêndio, em consequência do efeito térmico elevado, sofrem degeneração de suas características físicas e químicas acarretando na diminuição de sua resistência e rigidez e na alteração das condições do estado inicial de tensões e deformações da estrutura. A garantia da estabilidade de um elemento estrutural de aço sob a ação do fogo, é verificada por meio do domínio do tempo, da temperatura e da resistência. Os critérios de dimensionamento são estabelecidos em função das curvas temperatura versus tempo, onde é possível calcular a ação térmica nos elementos estruturais. O objetivo deste trabalho é comparar os métodos de dimensionamento simplificado para o cálculo na tração de barras sob o efeito de gradientes térmicos elevados, proposto pela ABNT NBR 14323:1999 e o apresentado na versão mais recente da respectiva norma publicado em 2013. Os resultados indicaram que a norma mais recente se mostra menos conservadora. No Brasil, os estudos pertinentes a ação do fogo nas estruturas vem aumentando, entretanto ainda há muito a ser realizado, como a simulação em escala real do comportamento do incêndio em um compartimento.*

Palavras Chaves: Análise termoestructural, Estruturas metálicas, Incêndio, Análise analítica e Dimensionamento.

1 INTRODUÇÃO

Durante a ocorrência do fenômeno do incêndio em um compartimento, a análise da resistência das estruturas de aço pode ser realizada por meio de uma combinação de ações que a estrutura esteja submetida à temperatura ambiente, somado ao efeito simultâneo de elevados gradientes térmicos do incêndio, com objetivo de projetar as edificações para resistir as solicitações de tal situação. (Rigobello, 2011)

Os métodos de dimensionamentos que serão apresentados neste trabalho referem-se as análises das respostas dos membros individuais de aço que compõe a estrutura. Dessa forma, não é levado em consideração a interação que existe entre esses elementos durante a propagação do calor na estrutura. (Kirchhof, 2004)

Os procedimentos da engenharia de segurança contra incêndio estão baseados em análises complexas, quando comparadas com o mesmo fenômeno em temperatura ambiente. Considerando que para cada situação o comportamento do incêndio se altera, de tal forma que tenha seus efeitos atenuados não podendo ser descartado durante a fase de projeto da edificação. (Rigobello, 2011)

Os resultados das análises analíticas serão fundamentais para avaliar o desenvolvimento tecnológico no ramo das pesquisas sobre estruturas de aço em situação de incêndio, onde será possível estimular o meio técnico a adotar medidas de proteção das estruturas de forma eficiente, econômica e simplificada

2 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

As estruturas de aço quando submetidas a gradientes térmicos elevados decorrentes de um incêndio sofrem, progressivamente, diminuição de resistência e rigidez, além de alterações nas condições do estado inicial de equilíbrio promovendo tensões e deformações estruturais. (Silva, 1997)

A garantia da estabilidade de um elemento estrutural de aço sob a ação do fogo, é verificada por meio do domínio do tempo, da temperatura e da resistência.

Segundo (Mesquita, 2013) no domínio temporal a estrutura deve ser projetada para resistir a um tempo que possibilite a fuga em segurança dos usuários e a segurança das equipes de combate a incêndio sem sofrer o colapso. Nas normas brasileiras está relacionada com o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo. É representado pela equação 1

$$t_{f,d} > t_{f,req} \quad (1)$$

Onde:

$t_{f,req}$ - é o tempo requerido de resistência ao fogo;

$t_{f,d}$ - é o valor de cálculo de resistência ao fogo com base no incêndio padrão ISO 834.

Para que o elemento estrutural de aço não sofra o colapso durante a ação térmica, é necessário que sua temperatura seja inferior a temperatura crítica. Este critério é denominado de verificação no domínio da temperatura. Dessa forma, de acordo com Silva (2001), a segurança das estruturas é atendida, em situação de incêndio, quando a temperatura atuante nos elementos estruturais de aço é inferior a temperatura que promove o colapso estrutural, ou seja, a temperatura crítica.

A equação 2 representa a verificação da segurança estrutural pela análise do grau temperatura.

$$\theta_a \leq \theta_{cr} \quad (2)$$

Onde:

θ_a - é a temperatura do aço;

θ_{cr} - é a temperatura crítica.

Para o cálculo no domínio da resistência, são levados em conta o efeito simultâneo das ações que a estrutura esteja submetida em temperatura ambiente, somado as ações excepcionais (ação do fogo). Com base nessa combinação acidental é calculado a capacidade resistente dos elementos estruturais, que deve ser inferior ao cálculo da solicitação em situação de incêndio. (Mesquita, 2013)

$$R_{fi,d} \geq S_{fi,d} \quad (3)$$

$S_{fi,d}$ - é o esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio, obtido a partir da combinação de ações;

$R_{fi,d}$ - é o esforço resistente de cálculo correspondente do elemento estrutural para o estado limite ultimo em consideração, em situação de incêndio.

3 METODOLOGIA

O modelo analítico abordado neste estudo refere-se ao método simplificado de dimensionamento, proposto pela NBR 14323:2013 para a determinação da ação térmica que atinge a estrutura durante a ocorrência de um incêndio na edificação. Com essa ferramenta é possível calcular o gradiente térmico por meio do fluxo de radiação e convecção que se emanam das chamas.

O método simplificado de dimensionamento é aplicado aos elementos estruturais envolvidos pelos gases quentes, provocado pela ocorrência de um incêndio no interior de um compartimento. Aplica-se, ainda, em elementos externos à edificação de forma favorável a segurança, todavia não será abordado neste estudo. (Silva, 2001).

Sem desprezar as deformações causadas pelo efeito térmico, a análise da resistência será realizada de modo que o módulo de elasticidade do aço e seu, respectivo, limite de escoamento seja constante e com seu valor adotado em temperatura elevada. (NBR 14323:1999) O objetivo desta análise é determinar a carga última da capacidade resistente do elemento estrutural de aço.

Para obtenção dos valores da capacidade resistente dos elementos estruturais de aço através desse método, é necessário levar em conta que a análise térmica seja do tipo estacionária, ou seja, a distribuição de temperatura e de outras grandezas térmicas ao longo da seção transversal e do comprimento do elemento de aço deverá ser considerada uniforme. (Rodrigues, 2013)

Para os casos em que a engenharia de segurança adota o incêndio padrão, as mesmas expressões deste método podem ser empregadas, levando-se em conta os efeitos de uma distribuição de temperatura variável por meio de fatores de redução de resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade correspondente a maior temperatura atingida pela peça durante a ação do gradiente térmico. (NBR 14323:2013).

A metodologia de cálculo abordada neste trabalho seguirá os procedimentos de cálculo estabelecidos por Silva, 2001. Entretanto, será readaptada para a nova formulação proposta pela NBR 14323:2013. Dessa forma, suceder-se-á, com a determinação dos esforços resistentes dos elementos estruturais na tração, comparando com os resultados obtidos na versão anterior da norma em 1999.

De acordo com Silva, 2001 as simulações analíticas que serão apresentadas neste estudo foram realizadas de acordo com as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Elemento estrutural totalmente imerso no ambiente em chamas;
- Distribuição uniforme de temperatura no elemento estrutural;
- Fluxo de calor unidimensional no elemento estrutural;
- Recomenda-se tomar $\Delta_t < 5s$.

4 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA NO ELEMENTO ESTRUTURAL

Para uma análise mais sofisticada do comportamento da peça de aço sujeita às elevadas trocas de calor provocada pela ação do fogo, é necessário entender como se procede a distribuição da temperatura ao longo de sua seção transversal por meio da análise da transferência de calor. (Campêlo, 2008)

Quando o fenômeno do incêndio ocorre em um ambiente, a temperatura dos elementos estruturais após um intervalo de tempo, tende a se aproximar da temperatura dos gases quentes. (Kimura, 2009). Essa desigualdade de temperatura gera uma ação térmica, caracterizada por um fluxo de calor que por radiação e por convecção se transfere para estrutura, fazendo com que haja elevação de temperatura no elemento estrutural. (Silva, 2001)

A radiação, é definida como o processo no qual o calor não necessita de um meio físico para se propagar. Ele flui em forma de ondas, de um corpo à elevadas temperaturas para a superfície de outro, com temperatura mais baixa. (Dorr, 2010)

Já a convecção se trata da transferência de calor por movimentação dos fluidos, gases ou líquidos. Quando a transferência de calor ocorre por meio do fluxo convectivo é analisado a propagação da chama, por meio do transporte da fumaça e na permanência dos gases quentes no teto ou para fora do compartimento incendiado. (Azevedo, 2010)

Os principais mecanismos de análise térmica de um elemento estrutural sujeito a ação de um incêndio são representados por meio: de resultados de ensaios, de modelos simplificados e modelos avançados ou computacionais. (Rigobello, 2011). Considerando-se o equilíbrio térmico entre o calor proveniente do incêndio e o calor absorvido pelo perfil de aço, torna-se possível determinar o acréscimo de temperatura. (Campêlo, 2008)

4.1 Fator de Massividade

A temperatura que a estrutura atinge durante um incêndio é fortemente influenciada pela relação que existe entre área superficial exposta ao calor e a massa do perfil. A essa relação dar-se o nome de fator de massividade. (Bellei, 2008)

Para as barras prismáticas o fator de massividade pode ser expresso, pela relação entre perímetro exposto ao fogo (u) e a área da seção transversal da barra, sendo conhecido também, como fator de forma da seção. (Silva, 2001)

Com relação aos elementos estruturais de aço sem proteção térmica sujeito a ação do fogo, o fator de massividade pode ser expresso pela equação 4

$$u/A_g \quad (4)$$

Onde:

u - é o perímetro do elemento estrutural de aço, exposto ao incêndio;

A_g - é a área da seção transversal do elemento estrutural de aço.

É possível deduzir que elementos com mesma área, aqueles que possuir menor exposição ao incêndio, terá seu aquecimento lento comparando com os outros elementos. E para os elementos com a mesma superfície exposta ao incêndio, aquele que possuir maior massa, terá seu aquecimento de forma mais lenta também. (Rodrigues, 2013)

Portanto, quanto menor for o fator de massividade de um elemento estrutural maior será sua capacidade de resistência à várias temperaturas que esteja submetido. (Bellei, 2008).

4.2 Elemento sem Proteção Térmica

4.2.1 Generalidade

A NBR 14323:2013 estabelece que para uma distribuição uniforme de temperatura ao longo da seção transversal, a elevação da temperatura, $\Delta\theta_{a,t}$, de um elemento estrutural de aço sem revestimento contra o fogo situado no interior de uma edificação, durante um intervalo de tempo, pode ser determinada por meio da equação 5

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{(u/A_g)}{\rho_a c_a} \varphi \Delta_t \quad (5)$$

Onde:

$\Delta\theta_{a,t}$ - é a variação de temperatura em um elemento estrutural de aço, durante um intervalo de tempo Δt ;

k_{sh} - é um fator de correção para o efeito de sombreamento, que pode ser tomada igual a 1,0 ou determinado conforme veremos mais adiante;

u/A_g - é o fator de massividade para elementos estruturais de aço sem revestimento contra o fogo, expresso em metros a menos um (m^{-1});

ρ_a - é a massa específica do aço, expressa em quilograma por metro cúbico (kg/m^3);

c_a - é o calor específico do aço, expresso em joules por quilogramas e por graus Celsius ($J/kg\ ^\circ C$);

φ - é o valor do fluxo de calor por unidade de área, expresso em watts por metro quadrado (W/m^2);

Δ_t - é o intervalo de tempo, expresso em segundos.

4.2.2 Efeito de Sombreamento

O efeito de sombreamento é caracterizado por atuar em perfis de formato côncavo, em seções transversais H ou I. É causado pela obstrução local da radiação térmica devido o formato do perfil de aço, conforme é apresentado na figura 1 (Rigobello, 2011).

O fator de sombreamento para os perfis I ou H, sujeitos a ação térmica de um incêndio padrão é representado pela equação 6:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(u/A_g)_b}{(u/A_g)} \quad (6)$$

Onde:

$(u/A_g)_b$ - é o valor do fator de massividade, definido como a relação entre o perímetro exposto ao incêndio de uma caixa hipotética que envolve o perfil e área da seção transversal do perfil;

(u/A_g) - é o fator de massividade para elementos estruturais de aço sem revestimento contra o fogo.

Para seções transversais fechadas como as seções caixões e tubulares, circulares e retangulares e seções sólidas como as retangulares, totalmente expostas ao incêndio, o valor de $k_{sh} = 1$, conforme Figura 1.



Figura 1. Efeito de sombreamento: a) Seção aberta; b) Seção fechada.

4.3.3 Metodologia de Cálculo

É citado em Silva, 2001 um roteiro de cálculo para a determinação da temperatura que atua no elemento estrutural, por meio da ação de um incêndio padrão. O procedimento foi adaptado para o cálculo estabelecido pela NBR 14323:2013, conforme segue a seguir.

Admita-se:

$$\theta_a(t = 0) = 20^\circ C \quad (7)$$

Onde:

$\theta_a(t = 0)$ - é a temperatura do aço em temperatura ambiente.

Toma-se $t = 5s$;

Determina-se a temperatura dos gases:

$$\theta_g(t) = 345 \log(8t+1) + 20; \quad (8)$$

Onde:

$\theta_g(t)$ - é a temperatura dos gases no tempo t ;

t - é o tempo em minutos.

Determina-se o fluxo de calor devido à radiação:

$$\varphi_r(t) = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} \left[(\theta_g(t) + 273)^4 - (\theta_a(t - \Delta t) + 273)^4 \right] \quad (9)$$

Para $\Delta t = 5/60 \text{ min}$ e $\xi_{res} = 0,7$

Onde:

φ_r - é o componente do fluxo de calor devido a radiação;

ξ_{res} - é a emissividade resultante;

$\theta_g(t)$ - é a temperatura dos gases no tempo t ;

$\theta_a(t - \Delta t)$ - é a temperatura do aço no instante $t - \Delta t$.

Determina-se o fluxo de calor devido a convecção:

$$\varphi_c(t) = \alpha_c(\theta_g(t) - \theta_a(t - \Delta t)) \quad (10)$$

Onde:

α_c - é o coeficiente de transferência de calor por convecção, tomado igual a 25 W/m².

Determina-se o fluxo de calor:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (11)$$

Onde:

φ - é o valor do fluxo de calor por unidade de área;

Determina-se a variação de temperatura do aço $\Delta\theta_{a,t}$

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{(u/A_g)}{\rho_a c_a} \varphi \Delta t \quad (12)$$

Determina-se o valor da temperatura do aço

$$\theta_a(t) = \theta_a(t - \Delta t) + \Delta\theta \quad (13)$$

Volta-se ao item c, com $t + \Delta t$, no lugar de t.

A figura 2 apresenta a influência do fator de massividade na determinação da temperatura do elemento estrutural.

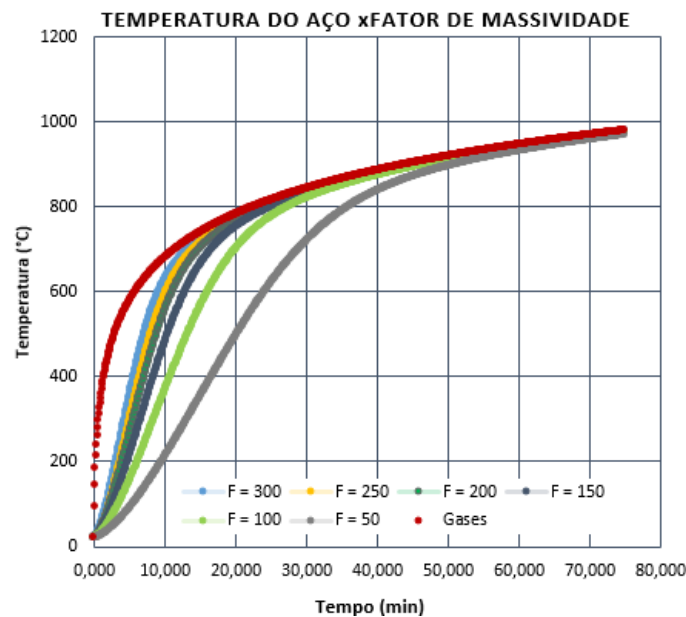


Figura 2. Temperatura do aço em função do fator de massividade

5 – CÁLCULO DA RESISTÊNCIA

Um perfil W 150x37,1 em aço MR250 é submetido a uma carga axial de tração $N_{fi,sd} = 200$ kN. Admitindo que o membro esteja sujeito a uma ação de um incêndio padrão ISO 834, determine a resistência do elemento após 30 minutos de exposição. Considere que, no primeiro caso, os quatro lados do elemento estrutural estão expostos às chamas e no segundo caso, há

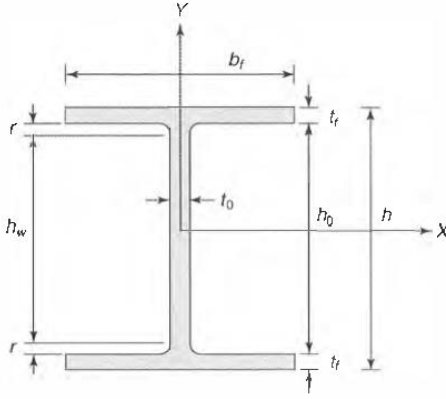
exposição dos três lados. Verifique se o perfil atende as condições mínimas quanto a verificação no domínio da temperatura e da resistência.

Admitindo que o elemento esteja com os quatro lados expostos, de acordo com a NBR 14323:2013 teremos:

$$\theta_g = 345 \log(8 * 30 + 1) + 20 = 842 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (14)$$

Determinação da temperatura dos gases:

Na sequência, calcula-se o fator de massividade de acordo com as características do perfil, conforme a seguir na Tabela 1.



Perfil	Massa	Alt.	Área	Alma		Mesa		Eixo X-X				Eixo Y-Y				J		
I	m	h	A	t _w	h ₀	t _f	b _f	I _x	W _x	i _x	Z _x	I _y	W _y	i _y	Z _y	cm ⁴	b _f /2t _f	h ₀ /t _w
	kg/m	mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	cm ⁴	cm ³	cm	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm	cm ³	cm ⁴		
W 150 × 22,5	22,5	152	29,0	5,8	139	6,6	152	1229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,9	4,8	11,5	20,5
W 150 × 29,8	29,8	157	38,5	6,6	138	9,3	153	1739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,8	11,0	8,2	17,9
W 150 × 37,1	37,1	162	47,8	8,1	139	11,6	154	2244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,4	20,6	6,6	14,7

Tabela 1. Perfil W 150 X 37,1

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(u/A_g)_b}{(u/A_g)}$$

$$\left(\frac{u}{A_g}\right) = \frac{2d + 4f - 2t_0}{A_g} = \frac{2 \cdot 16,2 + 4 \cdot 15,4 - 2 \cdot 0,81}{47,8} \cdot 100 = 193,26 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

$$\left(\frac{u}{A_g}\right)_b = \frac{2(b+h)}{47,8} = \frac{2(15,4 + 16,2)}{47,8} \cdot 100 = 131,67 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(u/A_g)_b}{(u/A_g)} = k_{sh} = 0,9 \frac{131,67}{193,26} = 0,632$$

$$\text{Logo: } k_{sh} \cdot \left(\frac{u}{A_g}\right) = 0,6132 \cdot 193,26 = 118,34 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

Em seguida, utiliza-se o modelo de Franssen e Real, 2012 para determinação da temperatura do aço desprovido de proteção térmica, exposto 30 minutos ao incêndio ISO 834, no instante $t - \Delta t$, conforme tabela 2:

Temperature of unprotected steel in °C, exposed to the ISO 834 fire curve for different values of $k_{sh} \frac{A_m}{V}$, [m ⁻¹] (continued)											
Time [min.]	10 m ⁻¹	15 m ⁻¹	20 m ⁻¹	25 m ⁻¹	30 m ⁻¹	40 m ⁻¹	60 m ⁻¹	100 m ⁻¹	200 m ⁻¹	300 m ⁻¹	400 m ⁻¹
24	197	271	337	396	448	532	641	726	767	791	799
25	207	284	353	414	467	552	658	732	780	801	807
26	217	298	369	432	485	570	674	735	792	809	813
27	227	311	385	449	503	588	688	739	803	816	820
28	237	324	401	466	521	604	701	746	813	823	826
29	247	338	416	482	538	621	712	756	821	829	831
30	257	351	431	498	554	636	721	767	828	835	837

Tabela 2. Temperatura do aço sem proteção, exposto ao Incêndio Padrão ISO 834

Para os valores intermediários de $\theta_a(t - \Delta t)$ é necessário interpolar. No caso deste estudo o valor determinado foi $\theta_a(t - \Delta t) = 777,34^\circ\text{C}$

Determina-se o fluxo radioativo:

$$\varphi_r(t) = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} \left[(\theta_g(t) + 273)^4 - (\theta_a(t - \Delta t) + 273)^4 \right]$$

$$\varphi_r(t) = 5,67 \times 10^{-8} \cdot 0,7 [(842 + 273)^4 - (777,34 + 273)^4] = 13039,24 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Determina-se o fluxo de calor devido a convecção

$$\varphi_c(t) = \alpha_c (\theta_g(t) - \theta_a(t - \Delta t))$$

$$\varphi_c(t) = 25(842 - 777,34) = 1615,5 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Determinação do fluxo total

$$\varphi = \varphi_r + \varphi_c$$

$$\varphi = 13039,24 + 1615,5 = 14654,74 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Determinação do acréscimo de temperatura do aço:

$$\Delta\theta_a = k_{sh} \frac{(U/A_g)}{\rho_a C_a} \varphi \Delta t$$

$$\Delta\theta_a = \frac{118,34}{7850 \cdot 600} 14654,74 \cdot 5 = 1,84^\circ\text{C}$$

Logo:

$$\Delta\theta_a = \theta_a - \theta_a(t - \Delta t)$$

$$\theta_a = \Delta\theta_a + \theta_a(t - \Delta t)$$

$$\theta_a = 1,84 + 777,34$$

$$\theta_a = 779,18^\circ\text{C}$$

O próximo passo é determinar o fator de redução de resistência ao escoamento do perfil em temperatura elevada. Para isso, utiliza-se os coeficientes de redução adotados pela NBR 14323:2013, conforme apresenta a Tabela 3.

Temperatura do aço θ_a °C	Fator de redução da resistência ao escoamento ^a $k_{y,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade ^a $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
800	0,110	0,090
900	0,060	0,068
1 000	0,040	0,045
1 100	0,020	0,023
1 200	0,000	0,000

^a Para valores intermediários da temperatura do aço, pode ser feita interpolação linear.

Tabela 3. Fator de redução da resistência ao escoamento x temperatura do aço

Por interpolação, obtém-se o valor do fator de redução da resistência ao escoamento,
 $K_{y,\theta} = 0,1350$

Para a tração a resistência de cálculo é:

$$N_{fi,Rd} = A_g K_{y,\theta} f_y = 47,8 \cdot 0,1350 \cdot 25 = 161,325 \text{ kN}$$

Verificações

Domínio da Temperatura

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot K_{y,\theta}^{3,833}} - 1 \right) + 482 < \theta_a$$

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot 0,1350^{3,833}} - 1 \right) + 482 < 787,767$$

$$\theta_{cr} = 784,084^\circ\text{C} < 787,767^\circ\text{C}$$

(Atende)

Domínio da Resistência

$$R_{fi,Rd} \geq S_{fi,Rd}$$

$$161,325 \text{ (kN)} \leq 200 \text{ (kN)}$$

(Não Atende)

A Tabela 4 apresenta um resumo dos cálculos para determinação da resistência do perfil, admitindo que o elemento de aço sem proteção térmica esteja com os 3 lados expostos. De acordo com a NBR 14323:2013, obtém-se:

$\left(\frac{u}{A_g}\right)$ (m^{-1})	$\left(\frac{u}{A_g}\right)_b$ (m^{-1})	$k_{sh} \left(\frac{u}{A_g}\right)$ (m^{-1})	$\theta_a(t - \Delta t)$ ($^\circ\text{C}$)	φ_r (W/m^2)	φ_c (W/m^2)	φ (W/m^2)	$\Delta\theta_a$ ($^\circ\text{C}$)	θ_a ($^\circ\text{C}$)	$R_{fi,Rd}$ KN
161,05	132,21	118,19	785,08	11599,55	1423	13022,55	1,634	786,714	114,03

Tabela 4. Determinação da resistência do elemento estrutural de aço, conforme NBR 14323:2013

Verificações

Domínio da Temperatura

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot K_{y,\theta}^{3,833}} - 1 \right) + 482 < \theta_a$$

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot 0,1226^{3,833}} - 1 \right) + 482 < 786,71$$

$$\theta_{cr} = 793,738^\circ\text{C} < 786,714^\circ\text{C}$$

(Não Atende)

Domínio da Resistência

$$R_{fi,Rd} \geq S_{fi,Rd}$$

$$151,287 \text{ (kN)} \leq 200 \text{ (kN)}$$

(Não Resiste)

Admitindo que o elemento esteja com os quatro lados expostos, de acordo com a NBR 14323:1999 teremos:

A temperatura dos gases:

$$\theta_g = 345 \log(8 * 30 + 1) + 20 = 842 \text{ } ^\circ\text{C}$$

O fator de massividade de acordo com as características do perfil apresentado na figura 4 é obtido da seguinte maneira:

$$\left(\frac{u}{A_g}\right) = \frac{2d + 4f - 2t_0}{A_g} = \frac{2 \cdot 16,2 + 4 \cdot 15,4 - 2 \cdot 0,81}{47,8} \cdot 100 = 193,26 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

Em seguida, utiliza-se o modelo de Franssen e Real, 2012 para determinação da temperatura do aço desprovido de proteção térmica, exposto 30 minutos ao incêndio ISO 834, no instante $t - \Delta t$, conforme foi apresentado na Tabela 2. Todavia, para esta versão da norma de 1999 não foi levado em conta o efeito de sombreamento, ou seja, $k_{sh} = 1$.

Dessa forma, para os valores intermediários de $\theta_a(t - \Delta t)$ é necessário interpolar. No caso deste estudo o valor determinado foi $\theta_a(t - \Delta t) = 823,28^\circ\text{C}$

Em seguida, determina-se o fluxo radioativo de calor:

$$\varphi_r(t) = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} \left[(\theta_g(t) + 273)^4 - (\theta_a(t - \Delta t) + 273)^4 \right]$$

$$\varphi_r(t) = 5,67 \times 10^{-8} \cdot 0,5 [(842 + 273)^4 - (823,28 + 273)^4] = 2869,40 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Na sequência, determina-se o fluxo de calor por convecção:

$$\varphi_c(t) = \alpha_c (\theta_g(t) - \theta_a(t - \Delta t))$$

$$\varphi_c(t) = 25(842 - 823,28) = 468 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Procede-se então com o cálculo do fluxo total de calor, que atinge o elemento estrutural de aço:

$$\varphi = \varphi_r + \varphi_c$$

$$\varphi = 2869,40 + 468 = 3337,4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Em seguida, determina-se o acréscimo de temperatura do aço

$$\Delta\theta_a = \frac{(U/A_g)}{\rho_a C_a} \varphi \Delta t$$

$$\Delta\theta_a = \frac{193,26}{7850 \cdot 600} 3337,4 \cdot 5 = 0,6847^\circ\text{C}$$

Logo:

$$\Delta\theta_a = \theta_a - \theta_a(t - \Delta t)$$

$$\theta_a = \Delta\theta_a + \theta_a(t - \Delta t)$$

$$\theta_a = 0,6847 + 823,28$$

$$\theta_a = 823,96^\circ\text{C}$$

Na sequência, determina-se o fator de redução do limite de escoamento para o cálculo da resistência à tração do elemento estrutural em situação de incêndio. Para isso, utiliza-se a tabela 3 observando que não houve mudança nos respectivos valores dos coeficientes na atualização de uma norma para outra.

Por interpolação, obtém-se o valor de $K_{y,\theta} = 0,09802$

Para a tração a resistência de cálculo é:

$$N_{fi,Rd} = A_g K_{y,\theta} f_y = 47,8 \cdot 0,09802 \cdot 25 = 117,13 \text{ kN}$$

Verificações

Domínio da Temperatura

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot K_{y,\theta}^{3,833}} - 1 \right) + 482 < \theta_a$$

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot 0,09802^{3,833}} - 1 \right) + 482 < 823,96$$

$$\theta_{cr} = 832,18^\circ\text{C} > 823,96^\circ\text{C}$$

(Não Atende)

Domínio da Resistência

$$R_{fi,Rd} \geq S_{fi,Rd}$$

$$117,1339 \text{ (kN)} \leq 200 \text{ (kN)}$$

(Não Resiste)

A Tabela 5 apresenta um resumo dos cálculos para determinação da resistência do perfil, admitindo que o elemento de aço sem proteção térmica esteja com os 3 lados expostos. De acordo com a NBR 14323:1999, obtém-se:

$\left(\frac{u}{A_g}\right)$ (m^{-1})	$\theta_a(t - \Delta t)$ ($^\circ\text{C}$)	φ_r (W/m^2)	φ_c (W/m^2)	φ (W/m^2)	$\Delta\theta_a$ ($^\circ\text{C}$)	θ_a ($^\circ\text{C}$)	$K_{y,\theta}$ -	$R_{fi,Rd}$ KN
161,05	803,53	5741,45	961,75	6703,2	1,15	804,68	0,10766	128,65

Tabela 5. Determinação da resistência do elemento estrutural de aço, conforme NBR 14323:1999

Verificações

Domínio da Temperatura

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot K_{y,\theta}^{3,833}} - 1 \right) + 482 < \theta_a$$

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot 0,10766^{3,833}} - 1 \right) + 482 < 823,96$$

$$\theta_{cr} = 818,09^\circ\text{C} > 803,53^\circ\text{C}$$

(Não Atende)

Domínio da Resistência

$$R_{fi,Rd} \geq S_{fi,Rd}$$

$$128,65 \text{ (kN)} \leq 200 \text{ (kN)}$$

(Não Resiste)

6 CONCLUSÃO

Neste estudo foram abordados os conceitos fundamentais para a análise da resistência dos elementos estruturais de aço sujeitos à ação do fenômeno do incêndio, através do método simplificado de dimensionamento utilizado pela ABNT NBR 14323 quando submetidos a uma carga axial de tração. Além disso, versou-se sobre como ocorre a transferência de calor das chamas para a estrutura, abordando também, as verificações necessárias das condições de segurança das edificações.

Ficou evidente a importância que o fator de massividade tem no dimensionamento das estruturas em situação de incêndio. Quanto maior for a massa do elemento maior será sua capacidade de absorver calor e resistir ao efeito térmico. Por outro lado, seu resfriamento ocorrerá de maneira lenta. Nos casos em que a massa do elemento for pequena, o fluxo de calor que penetra o elemento é caracterizado por elevar rapidamente a temperatura do perfil, tornando sua capacidade resistente baixa, em um intervalo de tempo menor.

Foi possível verificar que a não consideração do efeito de sombreamento pela norma de 1999, conduz a resultados conservadores, ou seja, em que o elemento possui menor resistência de projeto. No cálculo da parcela de radiação a emissividade utilizada pela norma de 1999 é de 0,5, em contra partida é adotado pela emissividade resultante de 0,7 pela referida norma em 2013. Dessa forma, não é possível verificar uma diferença tão significativa quando se compara os métodos a elementos tracionados.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 14323 (1999). *Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio – Procedimento*, 46pp., Rio de Janeiro;
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 14323 (2013). *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio*, 66pp., Rio de Janeiro;
- Azevedo, M.S. (2010). *Estruturas de Aço Externas a Edifícios em Situação de Incêndio*, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, SP, 302p
- Bellei, I.H. (2008). *Edifícios de Múltiplos Andares em Aço*, PINI Editora, Segunda Edição, São Paulo.
- Campêlo, L.S. (2008). *Estudo Numérico e Analítico para Determinação em Situação de Incêndio da Carga Crítica de Vigas de Aço com Carga Concentrada*, Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-002^a/2008, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 165 p.
- Dorr, J.B. (2010). *Modelos Numéricos de Pilares de Aço em Situação de Incêndio Considerando a Influência da Restrição Axial*, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Franssen, J. M., Real, P. V. (2012). *Fire Design of Steel Structures*, Ernst and Sohn.
- Kimura, E.F.A. (2009) *Análise Termoestrutural de Pilares de Aço em Situação de Incêndio*, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação e Concentração em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP.
- Kirchhof, L.D. (2004) *Uma Contribuição ao Estudo de Vigas Mistas Aço-Concreto Simplesmente Apoiado e em Situação de Incêndio*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP.
- Mesquita, A. (2013). *Verificação da Resistência de Estruturas de Aço ao Fogo*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Ramo de Estruturas, Faculdade de Ciências e Tecnologia / Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 98p.
- Rigobello, R. (2011). *Desenvolvimento e Aplicação de Código Computacional para Análise de Estruturas de Aço Aporticadas em Situação de Incêndio*, Tese de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Rodrigues L.T.D. (2013). *Determinação Numérica e Analítica da Carga Uniformemente Distribuída de Vigas de Aço em Situação de Incêndio Natural*, Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-007 A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 219p;
- Silva V.P. (1997). *Estruturas de Aço em Situação de Incêndio*, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, 170p.
- Silva V.P. (2001). *Estruturas de Aço em Situação de Incêndio*, Ziguarate Editora, São Paulo